

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651) 《环境科学》征稿简则 (3718) 信息 (3836, 3885, 3893)	

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案

严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇

(上海市环境科学研究院, 国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室, 上海 200233)

摘要: 随着大气污染治理措施的不断推进, 近年来上海市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现明显的下降趋势, 但 O_3 污染现象依然频发, 因此分析 O_3 污染发生规律, 科学制定 O_3 削峰方案是目前亟需解决的问题. 本研究以 2017 年 7 月为例, 期间长三角 17 个城市累计 O_3 污染天数 165 d, 其中上海最为严重, 7 月超标率为 64.5%, 分析前体物浓度和气象要素, 主要是由于高温、低湿、小风不利气象条件和较高的前体物排放共同导致, 期间上海市 NO_2 平均浓度为 $27.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, VOCs 体积分数为 22.5×10^{-9} . 通过 WRF-CMAQ 情景模拟, 仅上海进行前体物削减, 对区域性 O_3 污染控制较为有限, 建议多城市共同削减, 上海及邻近周边 9 城市削减 VOCs 排放 30%, 上海 O_3 日最大 8 h 浓度可下降 7.2%, 如果扩大到 17 个城市削减, 上海 O_3 日最大 8 h 浓度降幅为 7.8%. 同时建议严格控制前体物削减比例, VOCs: NO_x 削减比例应大于 3:1, 否则会导致部分地区 O_3 浓度反弹.

关键词: 臭氧(O_3); 削峰方案; 区域协同; 前体物削减比例; 数值模拟

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3577-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202011243

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai

YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, WANG Qian, AN Jing-yu

(State Environmental Protection Key Laboratory of Formation and Prevention of the Urban Air Complex, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: With the continuous development of air pollution control measures, the concentration of $\text{PM}_{2.5}$ in Shanghai has shown a conspicuous downward trend in recent years. However, frequent O_3 pollution events have highlighted the urgent need to explore the occurrence patterns of O_3 pollution and develop scientific strategies for reducing O_3 peaks. This study examines data from July 2017, when the cumulative number of O_3 pollution days in 17 cities in the Yangtze River Delta was 165 days, of which Shanghai was the most serious, with an exceedance rate of 64.5%. During this period, the average concentration of NO_2 in Shanghai was $27.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and volatile organic compounds (VOCs) mixing ratio was 22.5×10^{-9} . By analyzing ozone precursor concentrations and meteorological factors, we determined that these events mainly resulted from a combination of unfavorable meteorological conditions such as high temperature, low humidity, low wind speed, and high precursor emissions. WRF-CMAQ scenario simulations showed that a reduction in precursor emissions in Shanghai alone would have a limited controlling effect on regional O_3 pollution. Thus, regional joint control is recommended when widespread pollution events occur. Our analysis shows that if VOCs in Shanghai and nine neighboring cities can be reduced by 30%, the maximum 8-h O_3 concentration in Shanghai could be reduced by 7.2%. If the reduction number of these cities rises to 17, the maximum 8-h O_3 concentration reduction rate in Shanghai will increase to 7.8%. It is also recommended that the VOCs: NO_x reduction ratio should be strictly controlled at more than 3:1, or else the O_3 concentration in some areas will increase.

Key words: ozone(O_3); peak ozone control; regional joint; reduction ratio of ozone precursors; numerical simulation

对流层较高的臭氧(ozone, O_3)浓度影响人体健康和农作物生产,它的主要来源是大气中的氮氧化物(NO_x)和挥发性有机物(VOCs)等前体物在光化学过程中二次生成^[1~3].但是,在城市地区由于较高的人口密度和复杂的产业结构特征,造成工业源、交通源等人为活动产生大量的 NO_x 和VOCs排放,另外在植物中也会产生异戊二烯等VOCs的排放,使得近年来 O_3 污染事件频频发生,并且往往污染范围大,持续时间长.因此, O_3 污染问题已经得到了广泛的关注和讨论^[4~6],但是近年来中国 O_3 污染问题依然未得到有效控制,不同城市及区域都报道过 O_3 污染事件.Wang等^[7]报道了2005年北京夏季北部郊区的 O_3 小时体积分数高达 286×10^{-9} ;在珠三角地区,Wang等^[8]基于PRIDE-PRD2004观

测实验发现 O_3 小时浓度超过国家标准 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上;在上海,Shi等^[9]于2013夏季观测到 O_3 最大小时浓度高达 $357.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,更为不利的是,上海地面 O_3 体积分数从2006~2015年以每年 $0.8 \times 10^{-9} \sim 1.3 \times 10^{-9}$ 的速度在上升^[10];在中国的中部城市也同样报道了类似案例,Zeng等^[11]报道了武汉市2015年和2016年夏季的两次 O_3 污染过程.

随着 O_3 污染态势的日趋严重,多地政府也出台了 O_3 削峰方案和管控措施,如长沙市、成都市、郑州

收稿日期: 2020-11-28; 修订日期: 2021-01-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0213801); 上海市科技创新行动计划项目(20dz1204002)

作者简介: 严茹莎(1988~),女,硕士,工程师,主要研究方向为空气质量数值模拟,E-mail: yanrs@saes.sh.cn

市、南京市和珠三角地区等,这些 O_3 污染管控措施主要针对工业生产、交通运输和锅炉等,能有效降低 O_3 前体物包括 NO_x 和 VOCs 的排放量,根据已有研究,如果这些措施在严格执行的情况下,在珠三角地区 O_3 峰值浓度可至少降低 6%^[12]. 上海作为中国最大的城市之一,其常住人口达 2423.8 万,人口的高密度集聚对解决空气污染问题提出了更高的需求. 从 2013 年上海市实施清洁空气行动计划以来, $PM_{2.5}$ 已经从 2013 年的 $67 \mu g \cdot m^{-3}$ 下降到 2019 年的 $35 \mu g \cdot m^{-3}$, O_3 污染超标天数已超过 $PM_{2.5}$ 成为首要污染物,其中 2017 年 O_3 超标天数达 52 d^[13], 因此对于上海而言,如何有效削减 O_3 污染日峰值浓度,科学制定前体物削减量和削减比例是目前亟需解决的问题.

本研究以 2017 年 7 月为案例,分析上海 O_3 污染期间前体物浓度和气象要素的特征,并制定削减方案,利用 WRF-CMAQ 数值模型量化前体物削减与 O_3 浓度之间的关系.

1 材料与方法

1.1 观测数据来源

本研究使用的 O_3 和 NO_2 小时观测数据来自生态环境部空气质量数据平台系统^[14]. 气象数据来自虹桥机场自动气象站观测资料^[15],资料时间段为 2017 年 7 月. VOCs 观测数据来自上海市环境科学研究院(SAES, $31.17^\circ N$, $121.43^\circ E$)楼顶约 15 m

高度上的 GC-FID 观测设备. 本研究所观测的 VOCs 物种包括 56 种物质,包括 27 类烷烃、11 类烯烃、17 类芳香烃和乙炔,观测的时间分辨率为 30 min,时间为 2017 年 7 月 1~31 日. 仪器每 24 h 使用单点自动校准一次(标准化合物:丁烷、正己烷和苯),每月通过多点校准一次. 详细的仪器操作步骤可参考本研究团队之前的介绍^[16].

1.2 模拟方案设计

本研究采用 WRF-CMAQ 空气质量模型系统,气象场由 WRF-v3.9.1 (Weather Research and Forecasting) 提供^[17]. 研究采用三层嵌套网格(D01、D02 和 D03). 中心经纬度为 $118^\circ E$, $32^\circ N$. D01、D02 和 D03 的水平格距分辨率分别为 $36 km \times 36 km$ 、 $12 km \times 12 km$ 和 $4 km \times 4 km$. 模式垂直方向设为 27 层,模式顶层为 100 hPa. 气象初始场和侧边界资料选用 NCEP/NCAR 的 $1^\circ \times 1^\circ$ 全球再分析场资料,边界条件每 6 h 更新一次^[18].

本研究采用的空气质量模型为 CMAQ 5.2.1 版本^[19],模型选用 SAPRC07 气相化学机制^[20],采用 14 层垂直分层,D01 的网格数为 196×136 , D02 的网格数为 159×204 , D03 的网格数为 198×228 . D01 和 D02 采用 MEIC 排放清单^[21]; D03 区域采用 MEIC 清单,长三角地区排放清单采用本研究团队更新的 2017 年排放清单^[22],天然源排放清单均由 MEGAN-v2.10 模型计算提供^[23]. 模拟区域示意图 1 所示.

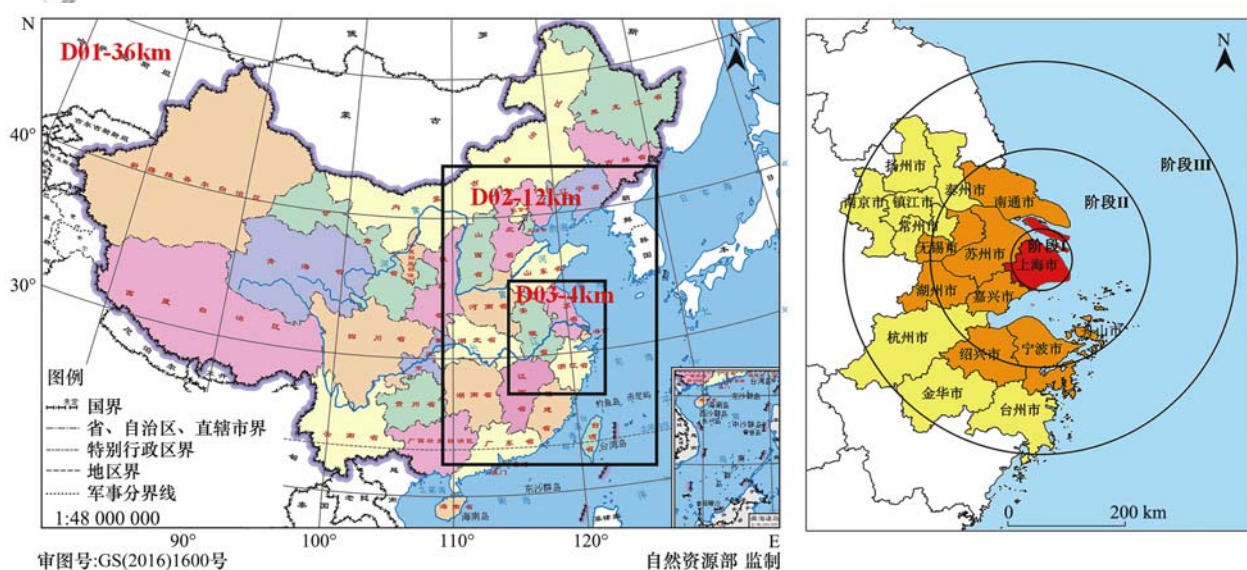


图 1 模型模拟区域及方案示意和情景方案区域示意

Fig. 1 Modeling domain of WRF-CMAQ model and tree stages of scenarios simulations

本研究除基准情景外,共设计了 12 组减排情景,分为 3 个阶段. 其中阶段 I 为仅上海市进行前体物削减,分别为上海市 VOCs 削减 30% (S1)、上海

市 NO_x 削减 30% (S2)、上海市 VOCs 减 30% 和 NO_x 减 10% (S3)、及上海市 NO_x 和 VOCs 均削减 30% (S4),从阶段 I 的情景可以分析单个城市削减对本

地 O₃ 浓度的减排效果；阶段Ⅱ考虑上海市和毗邻城市减排方案,共计 9 个城市(上海、南通、苏州、无锡、湖州、嘉兴、绍兴、宁波和舟山),前体物减排比例同阶段Ⅰ,分别记为 S5、S6、S7 和 S8,从这组情景的分析可得到近周边城市共同削减对上海及区域 O₃ 浓度的控制效果；阶段Ⅲ考虑区域 17 个城市减

排(上海、南通、苏州、无锡、湖州、嘉兴、绍兴、宁波、舟山、泰州、扬州、南京、镇江、常州、杭州、金华和台州),前体物减排比例同阶段Ⅰ和阶段Ⅱ,分别记为 S9、S10、S11 和 S12,从这组减排情景可以分析区域较大范围前体物削减对 O₃ 浓度的控制效果.具体 O₃ 削峰方案如表 1 所示.

表 1 O₃ 削峰方案设计
Table 1 Peak ozone reduction scenarios

阶段	情景	VOCs 削减比例/%	NO _x 削减比例/%	削减范围
	基准情景	0	0	
阶段Ⅰ (1 个城市)	S1	30	0	上海市
	S2	0	30	
	S3	30	10	
	S4	30	30	
阶段Ⅱ (9 个城市)	S5	30	0	上海市、南通市、苏州市、无锡市、湖州市、嘉兴市、绍兴市、宁波市和舟山市
	S6	0	30	
	S7	30	10	
	S8	30	30	
阶段Ⅲ (17 个城市)	S9	30	0	上海市、南通市、苏州市、无锡市、湖州市、嘉兴市、绍兴市、宁波市、舟山市、泰州市、扬州市、南京市、镇江市、常州市、杭州市、金华市和台州市
	S10	0	30	
	S11	30	10	
	S12	30	30	

1.3 准确性检验

为了验证模型模拟的准确性,本研究分别对 2017 年 7 月 WRF 气象场及 CMAQ 污染浓度进行检验.其中 WRF 气象场提取了虹桥机场 2 m 温度(T_2)、2 m 比湿(Q_2)、10 m 风速($WSPD_{10}$)和 10 m 风向($WDIR_{10}$)与观测结果进行比较,并与推荐值比较^[24],结果如表 2 所示,模拟期间各类气象统计参数均符合推荐值,具有较高的准确性.

表 2 WRF 气象因子准确性检验

Table 2 Validation of meteorological parameters for WRF simulation			
气象因子	统计参数	推荐值	上海虹桥
T_2/K	MB	±0.5	0.0
	GE	2.0	1.0
	IOA	0.8	1.0
$Q_2/g\cdot kg^{-1}$	MB	±1.0	0.0
	GE	2.0	1.0
	IOA	0.6	1.0
$WSPD_{10}/m\cdot s^{-1}$	RMSE	2.0	1.3
	MB	±0.5	-0.4
	IOA	0.6	0.8
$WDIR_{10}/(^{\circ})$	GE	30.0	29.7
	MB	±10	0.4

图 2 为 CMAQ 模型模拟期间的 NO₂ 日均浓度和 O₃ 日最大 8 h 浓度模型效果检验,本研究以上海市国控点平均值进行模型准确性检验.结果表明,总体模型可以较好反演 2017 年夏季上海市 O₃ 浓度变化趋势和 NO₂ 浓度变化趋势,两者相关性较高,NO₂ 的相关系数(R)为 0.78, O₃ 的相关系数为

0.8,模型对 NO₂ 和 O₃ 均略有低估,其中 NO₂ 的标准偏差(MB)为 -0.70, O₃ 的标准偏差为 -1.75.整体 WRF-CMAQ 模型的验证效果较好,可用于后续分析.

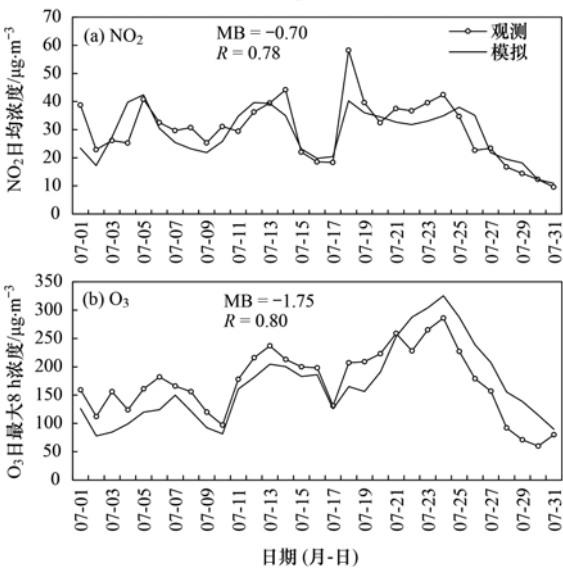


图 2 模拟浓度准确性检验

Fig. 2 Validation of O₃ and NO₂ concentrations

2 结果与讨论

2.1 污染特征概况

2017 年 7 月 1~31 日期间,长三角长时间受副热带高压控制,极端高温日数偏高,其中上海市高温日(日最高气温 35℃ 以上)达 24 d,导致期间相

对湿度整体偏低,月均湿度为 65%,从风场看 7 月平均风速为 $3.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风速较小,主导风向为来自内陆地区的西南风。在持续不利气象条件影响下,导致整个长三角地区出现大范围长时间 O_3 污染现象,从 O_3 AQI 超标情况看,上海市最为严重,重度污染达 3 d,中度污染为 6 d,轻度污染为 11 d,7 月 24 日 O_3 污染最严重, O_3 日最大 8 h 浓度达 $286 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。同时,前体物浓度也表现出较高水平,根据观测数据显示,期间上海市 NO_2 平均浓度为 $27.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,VOCs 观测到的体积分数为 22.5×10^{-9} 。具体如图 3 所示。

为了进一步分析在不同 O_3 浓度水平下 O_3 与前体物浓度及气象要素之间的关系,按 O_3 日最大 8 h 浓度大于 $215 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 归为高浓度水平,将日最大 8 h 浓度小于等于 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 归为低浓度水平,将介于两者之间归为中等浓度水平。根据图 4 结果显示,高浓度水平 O_3 日变化存在明显的夜间拖尾现象, O_3 浓度在夜间依然处于较高水平,对应的 NO_2 在早晚高峰时刻明显高于低浓度水平和中等浓度水平, O_3 高浓度水平下早高峰 NO_2 浓度峰值可达 $61.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,远高于低浓度水平下的

$15.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [图 4(b)]。同时,从 VOCs 的观测结果也可以看到,在 O_3 高浓度水平下,VOCs 浓度也显著高于 O_3 中等浓度和 O_3 低浓度水平下 VOCs 值,其中高浓度水平下 VOCs 日均体积分数为 28.0×10^{-9} ,中等浓度水平 VOCs 平均体积分数为 23.0×10^{-9} ,而低浓度水平 VOCs 体积分数仅为 10.7×10^{-9} [图 4(c)]。综合上述分析,较高的 O_3 污染水平与前体物浓度呈现较好的正相关性,这也与其他研究成果相一致^[25]。

根据 O_3 污染程度与气象要素的分析,高浓度水平下的气温显著偏高,日最高气温可达 39.0°C [图 4(d)]。较高的气温导致相对湿度整体偏低,日均湿度为 57.9%,而低浓度水平下的日均相对湿度可达 79.6% [图 4(e)]。另外较低的风速也是导致 O_3 污染的重要因素之一,统计结果显示,高污染水平下的平均风速较中等浓度水平偏低 17.9%,较低浓度水平偏低 39.6% [图 4(f)]。根据相关性统计结果显示(表 3), O_3 浓度与 NO_2 、VOCs、气温和湿度均显著相关,其中与气温的相关系数可达 0.81,与相对湿度之间的相关系数达 -0.78,因此,高温、低湿和静小风是导致 O_3 污染的重要气象条件^[26]。

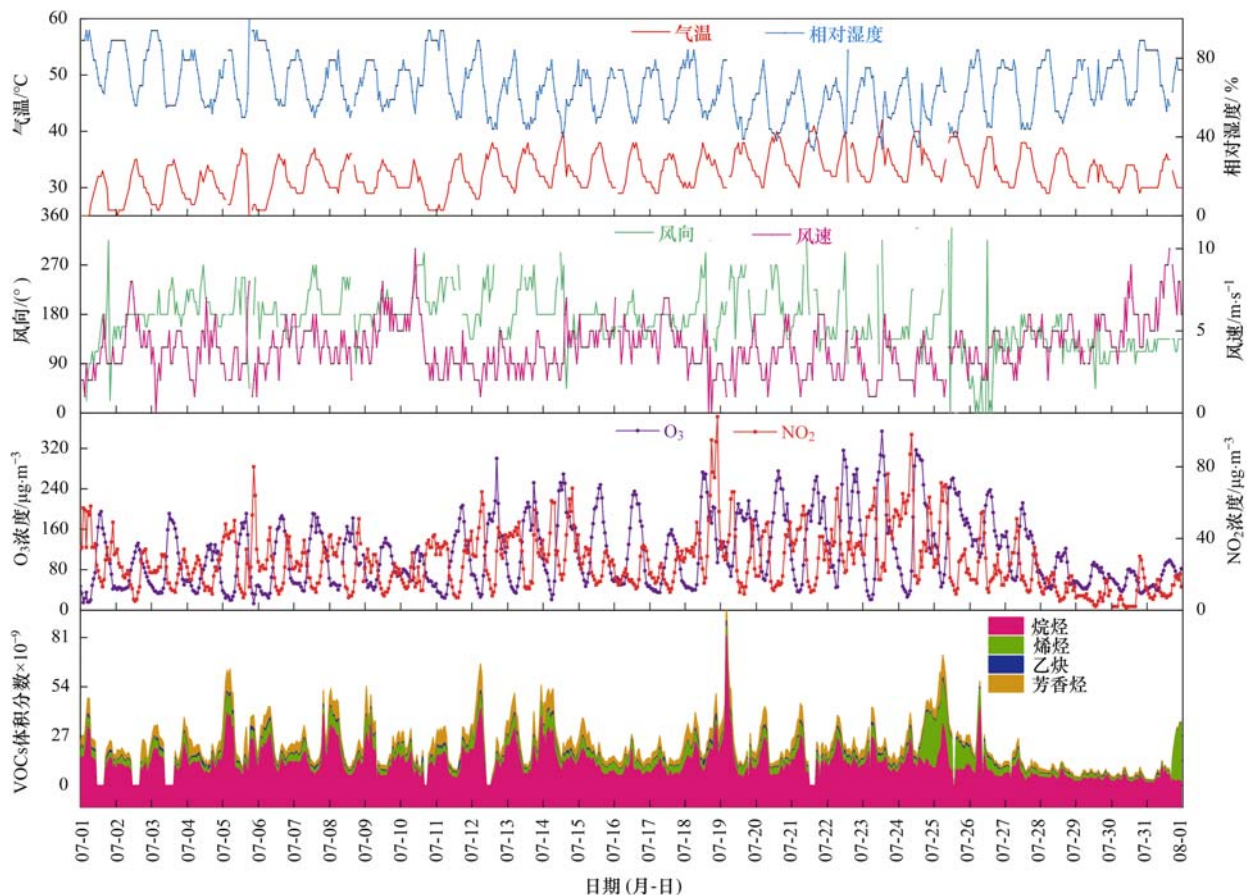
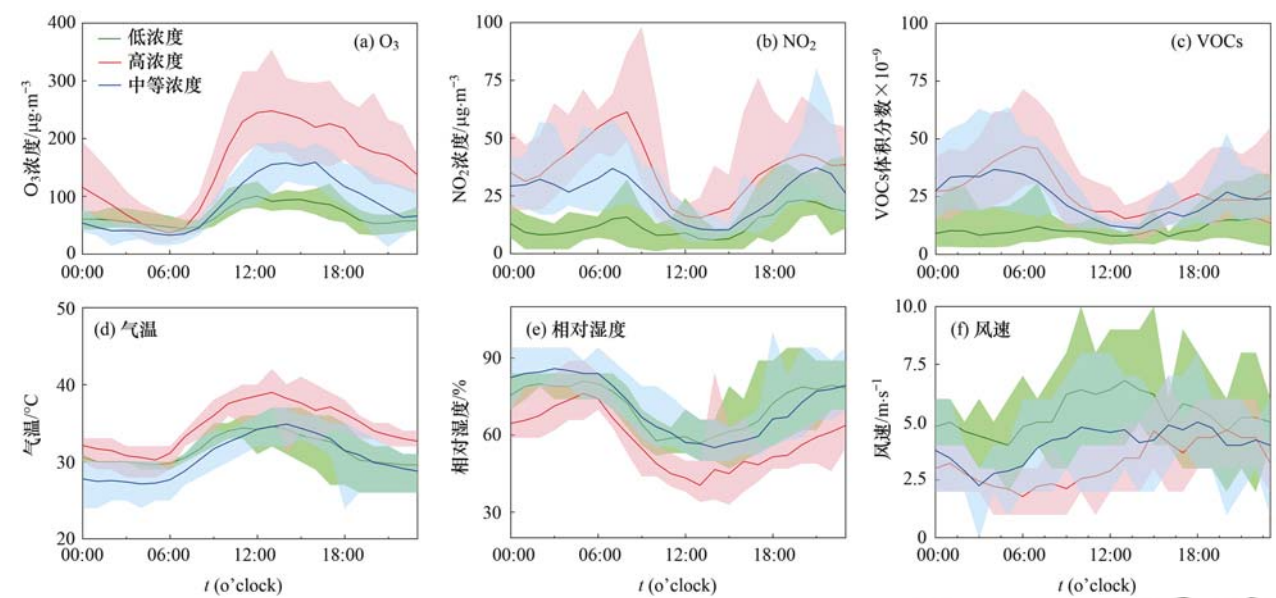


图 3 气象因子、 O_3 及前体物浓度时间序列变化特征

Fig. 3 Time series of meteorological factors, ozone, and precursors concentrations



颜色区域范围表示最大值和最小值,实线表示平均值

图4 不同污染浓度下臭氧、前体物浓度及气象因子日变化特征

Fig. 4 Diurnal variation of ozone, precursor concentrations, and meteorological factors at different pollution levels

表3 O₃ 与气象参数和前体物浓度的 Pearson 相关系数¹⁾

Table 3 Pearson's correlation coefficients between O₃, meteorological parameters, and precursor concentrations

项目	NO ₂ 浓度	VOCs 浓度	气温	相对湿度	风速
O ₃ 浓度	-0.16 **	-0.18 **	0.81 **	-0.78 **	0.03

1) **表示在0.01水平(双侧)上显著相关

2.2 模型模拟结果

根据上述分析,上海夏季 O₃ 污染与前体物浓度,不利气象条件相关.为了探索在不利气象条件下的 O₃ 削峰方案,本研究基于数值模拟的手段,设计不同减排情景,分析在不同情景下的 O₃ 浓度变化情况.

图5为减排情景与基准情景差异(臭氧日最大8 h 浓度月均之差),正值为 O₃ 浓度反弹,负值为 O₃ 浓度下降,可以看出,由于7月整体风向偏南,前体物减排效果均往北偏移,北移至洋面.对于阶段 I,仅削减上海本地的 NO_x 和 VOCs 的情景,对 O₃ 控制的程度和影响范围均较为有限,其中对于 S2,出现了 O₃ 浓度不降反升的现象,而 S1(仅削减上海 VOCs 排放量 30%)、S3(削减上海 VOCs 排放 30%,NO_x 削减 10%)、S4(上海 NO_x 和 VOCs 均削减 30%)3 组情景可以小幅削减上海市 O₃ 浓度,但是降幅较为有限,分别为 3.8%、2.4% 和 0.2%,综合阶段 I 中 4 组情景,如果控制上海市排放,削减 VOCs 排放的效果最优,如果同时削减 NO_x 和 VOCs 应严格控制两者比例,若要进一步增加 O₃ 削减幅度,需要进一步扩大控制范围.

从阶段 II,9 个城市的前体物减排分析看,上海及邻近城市共同削减 O₃ 前体物对上海的 O₃ 削峰效果更显著,同时对位于下风向的江苏地区也有比

较明显的臭氧浓度改善,对上风向地区的影响较小.对于上海而言,近周边 9 个城市仅削减 VOCs 可使 O₃ 浓度下降 7.2% (S5),但如果加上 NO_x 削减,反而会使 O₃ 降幅变弱, S7 和 S8 降幅分别为 6.0% 和 4.4%.但是增加 NO_x 的削减,会使受益区域增大.综合阶段 II 的 4 组情景,多城市共同削减对区域性 O₃ 污染能起到共赢的效果,但应该严格控制 NO_x 和 VOCs 的削减比例,如果削减过多的 NO_x 而 VOCs 的削减较少的情况,会导致如上海这类 VOCs 控制型城市出现 O₃ 反弹的情况^[27].

为了进一步探讨 O₃ 削峰方案区域控制的范围,在阶段 III 的基础上增加了外围一圈城市共计 17 个城市的减排情景.可以看出,下风向受益区域范围将进一步扩大,但对上海 O₃ 降幅与阶段 II 差异不大, S9 与 S5 相比, O₃ 浓度降幅从 7.2% 到 7.8%, S10 与 S6 变幅也较为相似, S11 上海 O₃ 降幅为 6.6%, S12 为 5.2%.因此,对于上海而言,本市及近周边城市(阶段 II)减排对其 O₃ 浓度削减起到了决定性的作用,而距离越远,减排效果也有所减弱.

综合以上分析,对于上海市臭氧削峰而言,如果仅本地实施减排措施,建议仅控制 VOCs 排放效果较好,但是降幅有限,尤其是对区域其他城市;因此建议区域协同削减,近周边 9 城市共同削减受益区

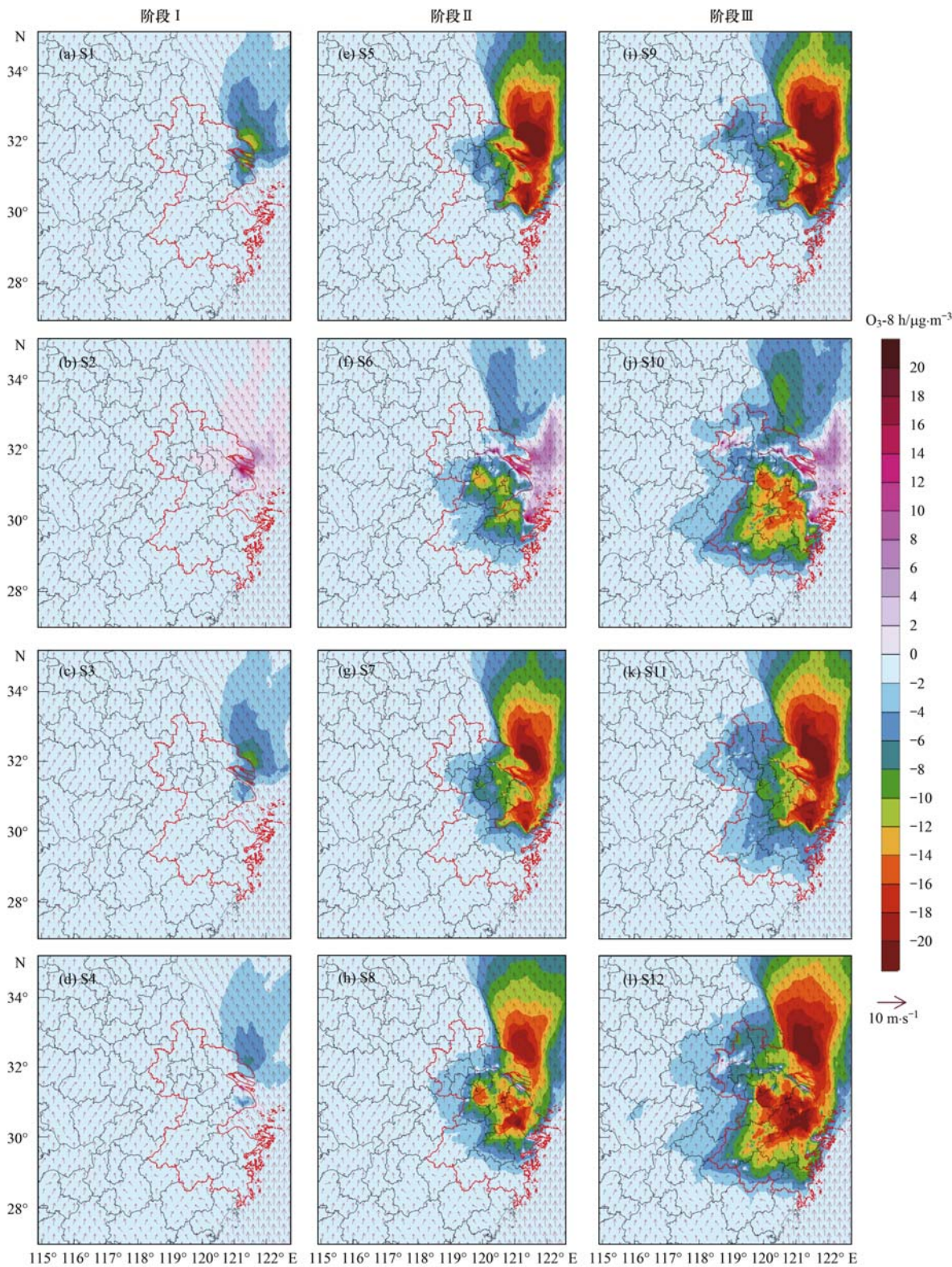


图 5 不同情景下臭氧浓度空间变化特征

Fig. 5 Characteristics of spatial variation in ozone concentration under different scenarios

域范围明显增大,上海 O_3 浓度峰值削减比例也增大,但应严格控制 NO_x 和 VOCs 减排比例,对于如 2017 年 7 月的长三角区域性 O_3 污染问题,建议进一步增加削减城市范围.

为了量化模拟情景对 17 个城市逐日 AQI 影响,将各情景 O_3 日最大 8 h 浓度转换为 O_3 AQI 值,

具体如图 6 所示. 可以看到,阶段 II 和阶段 III 的污染天数显著小于阶段 I,阶段 I 各情景 17 个城市累计污染天数分别为 163 (S1)、168 (S2)、165 (S3) 和 166 d (S4); 到阶段 II 污染天数降至 156 (S5)、160 (S6)、154 (S7) 和 159 d (S8); 到阶段 III,累计污染天数进一步下降,分别为 153 (S9)、153 (S10)、

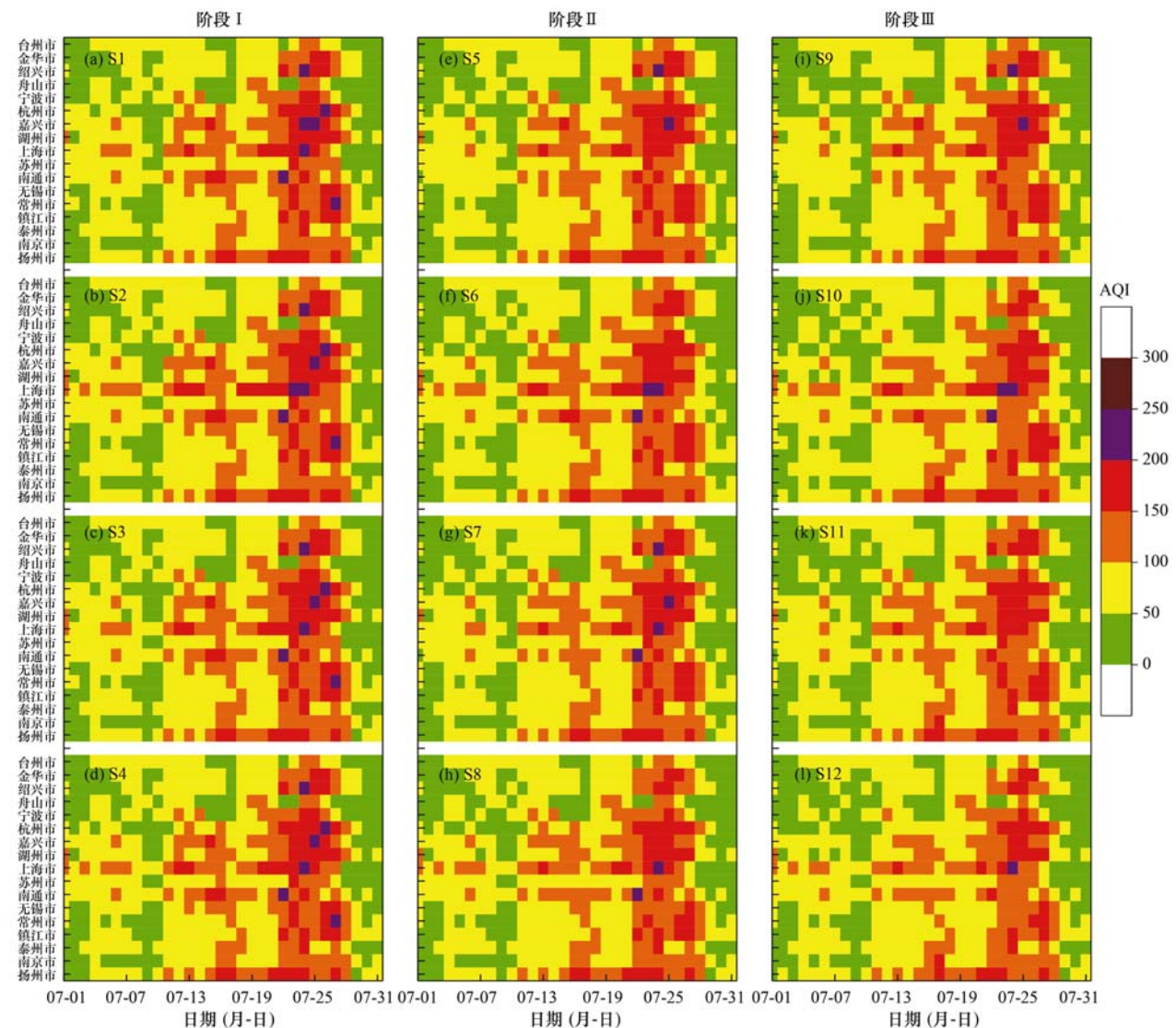


图 6 不同情景下长三角 17 城市 AQI 变化特征

Fig. 6 Changes in AQI values of 17 cities in the Yangtze River Delta under different scenarios

153(S11)和 143 d(S12). 另外,值得注意的是 S11, 即 17 个城市共同削减 NO_x 排放 10%、削减 VOCs 排放 30%,可以消除长三角区域 17 个城市 O_3 重污染天(基准情景重污染天数为 7 d),该情景轻度污染天数累计为 107 d(基准情景为 108 d)、中度污染天数为 46 d(基准情景为 50 d). 从长三角 17 个城市 AQI 日变化时间序列来看,在优良天 AQI 值各城市差异较小,而从污染日的角度削减的城市越多区域上总污染日数越少,阶段Ⅲ在不同削减比例下污染日数总体可以下降 12 ~ 22 d,而从削减重污染日数的角度,除了考虑削减的面积外,还需要严格考虑前体物比例,从阶段Ⅲ看, NO_x : VOCs 比例 1:3 效果要优于 1:1 或者仅 NO_x 、VOCs 削减. 因此,对于长三角区域长时间大范围 O_3 污染天气,区域共同进行前体物削减,并且将 NO_x 和 VOCs 的削减比例控制为 1:3 是收益较高的 O_3 削峰方案.

3 结论

- (1)2017 年 7 月长三角地区发生了大范围长时间的 O_3 污染现象,区域 17 个城市累计 O_3 超标天数为 165 d,是由高温、低湿、小风不利气象条件和较高的前体物排放共同导致,其中上海高温日数达到 24 d,从 O_3 超标情况看,上海市最为严重,7 月超标率为 64.5%,期间上海市 NO_2 平均浓度为 $27.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,VOCs 体积分数为 22.5×10^{-9} .
- (2)根据削峰情景分析,如果仅上海减排,建议仅控制 VOCs 排放 30%,上海 O_3 日最大 8 h 浓度月均值较基准情景将下降 3.8%,但是受益区域范围及 O_3 降幅较为有限,另外如果削减 NO_x 比例高于 VOCs,会导致 O_3 浓度不降反升的情况.
- (3)对于区域性 O_3 污染问题,建议区域协同削减,受益区域范围将显著上升,上海 O_3 浓度峰值削

减比例也增大,但应严格控制 NO_x 和 VOCs 减排比例,阶段 II 上海及近周边 9 城市削减 VOCs 排放 30%,上海 O_3 日最大 8 h 浓度可下降 7.2%,而阶段 III 将前体物控制城市扩大到 17 个,削减 VOCs 排放 30% 可使上海 O_3 日最大 8 h 浓度降幅变为 7.8%。

(4) 从控制比例来看,建议将 NO_x 和 VOCs 的削减比例控制在 1:3 以上, S11 即 17 个城市 NO_x 和 VOCs 分别减排 10% 和 30%,可以消除长三角区域 O_3 重污染天(基准情景重污染天数为 7 d)。

参考文献:

- [1] Wang P, Chen Y, Hu J L, *et al.* Attribution of tropospheric ozone to NO_x and VOC emissions: considering ozone formation in the transition regime[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(3): 1404-1412.
- [2] Wang P, Chen Y, Hu J L, *et al.* Source apportionment of summertime ozone in China using a source-oriented chemical transport model[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **211**: 79-90.
- [3] Liu Y M, Wang T. Worsening urban ozone pollution in China from 2013 to 2017-Part 2: the effects of emission changes and implications for multi-pollutant control [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(11): 6323-6337.
- [4] 严茹莎. 德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 3961-3968.
Yan R S. Ozone sensitivity analysis and emission controls in Dezhou in summer[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 3961-3968.
- [5] 闫慧, 张维, 侯墨, 等. 我国地级及以上城市臭氧污染源及控制区划分[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5215-5224.
Yan H, Zhang W, Hou M, *et al.* Sources and control area division of ozone pollution in cities at prefecture level and above in China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5215-5224.
- [6] Sun L, Xue L K, Wang Y H, *et al.* Impacts of meteorology and emissions on summertime surface ozone increases over central eastern China between 2003 and 2015 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(3): 1455-1469.
- [7] Wang T, Ding A J, Gao J, *et al.* Strong ozone production in urban plumes from Beijing, China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(21), doi: 10.1029/2006GL027689.
- [8] Wang X, Zhang Y, Hu Y, *et al.* Process analysis and sensitivity study of regional ozone formation over the Pearl River Delta, China, during the PRIDE-PRD2004 campaign using the community multiscale air quality modeling system [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(9): 4423-4437.
- [9] Shi C Z, Wang S S, Liu R, *et al.* A study of aerosol optical properties during ozone pollution episodes in 2013 over Shanghai, China[J]. *Atmospheric Research*, 2015, **153**: 235-249.
- [10] Xu J M, Tie X X, Gao W, *et al.* Measurement and model analyses of the ozone variation during 2006 to 2015 and its response to emission change in megacity Shanghai, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(14): 9017-9035.
- [11] Zeng P, Lyu X P, Guo H, *et al.* Causes of ozone pollution in summer in Wuhan, Central China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **241**: 852-861.
- [12] 沈劲, 陈多宏, 汪宇, 等. 基于情景分析的珠三角臭氧与前体物排放关系研究[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(10): 1925-1932.
Shen J, Chen D H, Wang Y, *et al.* Study on the relationship between ozone and precursors emission in the Pearl River Delta based on scenario analysis [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2018, **27**(10): 1925-1932.
- [13] 上海市生态环境局. 2019 上海市生态环境状况公报[R]. 上海: 上海市生态环境局, 2020.
- [14] 生态环境部. 生态环境部空气质量数据平台系统[EB/OL]. <http://106.37.208.233:20035/>, 2020-07-15.
- [15] Weather Underground. Weather underground historical data[EB/OL]. <https://www.wunderground.com/>, 2020-06-10.
- [16] Wang H L, Lou S R, Huang C, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds from biomass burning in Yangtze River Delta, China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, **14**(3): 818-828.
- [17] Skamarock W C, Klemp J B. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications[J]. *Journal of Computational Physics*, 2008, **227**(7): 3465-3485.
- [18] NCEP. NCEP FNL operational model global tropospheric analyses, continuing from July 1999 [EB/OL]. <https://doi.org/10.5065/D6M043C6>, 2018-01-10.
- [19] Community Modeling and Analysis System (CMAS). The community multiscale air quality modeling system [EB/OL]. <https://www.emascenter.org/>, 2018-02-01.
- [20] Carter W P L. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(40): 5324-5335.
- [21] Li M, Zhang Q, Kurokawa J I, *et al.* MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(2): 935-963.
- [22] An J Y, Huang Y W, Huang C, *et al.* Emission inventory of air pollutants and chemical speciation for specific anthropogenic sources based on local measurements in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2020, doi: 10.5194/acp-2020-582.
- [23] Guenther A B, Jiang X, Heald C L, *et al.* The model of emissions of gases and aerosols from nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions [J]. *Geoscientific Model Development*, 2012, **5**: 1471-1492.
- [24] Emery C, Tai E, Yarwood G. Enhanced meteorological modeling and performance evaluation for two Texas ozone episodes[R]. Austin: The Texas Natural Resource Conservation Commission, 2001. 1-35.
- [25] Li B W, Ho S, Gong S L, *et al.* Characterization of VOCs and their related atmospheric processes in a central Chinese city during severe ozone pollution periods[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(1): 617-638.
- [26] Lu X, Zhang L, Shen L. Meteorology and climate influences on tropospheric ozone: a review of natural sources, chemistry, and transport patterns[J]. *Current Pollution Reports*, 2019, **5**(4): 238-260.
- [27] Ding D, Xing J, Wang S X, *et al.* Impacts of emissions and meteorological changes on China's ozone pollution in the warm seasons of 2013 and 2017 [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, **13**(5), doi: 10.1007/s11783-019-1160-1.

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-rui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)